УДК 353.232.6

М.В. Коробчинський, М.Ю. Слонов, О.О. Марилів
Воєнно-дипломатична академія імені Євгенія Березняка, Україна
вул. Мельникова, 81, м. Київ, 04050

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ ДОБОВИХ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕМЕЛЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

M.V. Korobchinskiy, M.U. Slonov, A.A. Mariliv
Military Diplomatic Academy named after Yevhiy Berezniak, Ukraine
Melnikova st., 81, Kiev, 04050

MATHEMATIC MODEL OF FORECASTING DAILY CYCLE TEMPERATURE CHANGES OF AGRICULTURAL LANDS

Запропоновано математичну модель, яка дозволяє враховувати теплову інерцію земель сільськогосподарського призначення в інфрачервоному діапазоні. Проаналізовано можливі шляхи застосування тепловізорів при контролі земель сільськогосподарського призначення. Проведено порівняльний аналіз даних, отриманих за допомогою математичної моделі, з даними натурного експерименту.
Ключові слова*:* ґрунт, зміна температури, теплова інерція, час доби.
There has been introduced mathematic model that can take stock of thermal inertia of agricultural lands in infrared range. There has been analyzed a possible way of using thermal imager while controlling agricultural lands. There has been done analysis of information obtained from mathematic model and natural experiment.
Keywords*:* soil, temperature changes, thermal inertia, time of a day.

Вступ

У сучасному світі все більшого значення набуває аграрний сектор економіки. Найбільші економіки світу мають обмежені ресурси щодо вирощування аграрних культур і виробництва продуктів харчування. Так, у США, більшість земель, на яких можливе вирощування аграрних культур, вже задіяні у цій сфері, а значне їх збільшення неможливе у зв’язку із об’єктивними причинами (посушливі райони місцевості, гори, болота і т.п.). У Китаї та Індії, де фактично проживає половина населення Землі, відчувається значна нестача земель, придатних для вирощування власної аграрної продукції. Вочевидь, аграрний сектор економіки поступово набуває все більшого значення.

Особливе місце на сучасному етапі розвитку аграрного сектору займає питання моніторингу земель сільськогосподарського призначення (ЗСП). Це дозволяє вчасно реагувати на їх стан, а відтак, і прогнозувати подальші зміни врожайності. Одним із найбільш дешевих і ефективних шляхів видового моніторингу ЗСП є використання безпілотних літальних апаратів (БЛА). Такі БЛА обладнуються телевізійними камерами спостереження, що працюють у видимому та інфрачервоному (ІЧ) діапазоні електромагнітного спектру. Саме ІЧ діапазон має ряд переваг, що дозволяють більш ефективно проводити моніторинг ЗСП.

Таким чином, метою статті є прогнозування циклічних добових змін температури ЗСП для підвищення достовірності результатів моніторингу під час застосування БЛА, обладнаних тепловізорами.

Постановка проблеми

Одним із можливих способів збільшення об’ємів вирощування аграрних культур є інтенсивний. Він дозволяє збільшувати врожайність аграрних культур при незмінній площі ЗСП. Проте, для отримання максимальної врожайності, необхідно своєчасно проводити

моніторинг ЗСП. У даному контексті найбільш доцільно використовувати системи моніторингу із елементами штучного інтелекту. Це дозволить вчасно виявляти стан зрілості аграрних культур, проводити обробку від шкідників та хвороб і збирати врожай.

На даний час існує ряд систем моніторингу ЗСП із елементами штучного інтелекту, що без контролю оператора здатні проводити елементи посівної компанії, здійснювати контроль за ростом аграрних культур та збирати врожай. У дані системи входять: сервери для обробки інформації з моніторингу ЗСП (програмні алгоритми із елементами штучного інтелекту), БЛА для видового контролю, автоматизована сільськогосподарська техніка для посіву та збору врожаю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій [1-4] вказує на перспективність досліджень у напрямку визначення циклічних добових змін температури ЗСП. Так, робота [1] присвячена результатам експериментів з визначення теплового контрасту людини на фоні ґрунту (рослинності) при різній фоновій обстановці протягом доби в діапазонах 1,9 – 5,5 і 7,6 – 11,8 мкм.

Існуюча математична модель опису циклічної добової зміни температури ґрунтів наведена в патенті [2], також у даній роботі проводиться прогнозування значень температури протягом доби та інтервалів часу доби, коли циклічна добова зміна теплового контрасту максимальна та мінімальна. Наведена в роботі [2] математична модель не враховує всі фактори, що впливають на циклічну добову зміну температури ЗСП, а це, як наслідок, не дозволяє в повній мірі виконувати поставлені завдання. Перш за все, це викликано тим, що обмеження, які бралися при створенні математичної моделі, не враховували інерційних властивостей різних видів ґрунтів (зміну амплітуди і фази коливання температури). По друге, екстремуми значень температури досягаються в 0:00 та о 12:00, що не в повній мірі відповідає дійсності. А вплив географічного фактору і радіаційного випромінювання Сонця розкриті недостатньо. Основною причиною цього є неврахування математичною моделлю дійсного часу досягнення максимального (мінімального) значення температури навколишнього середовища, відповідно до прогнозу погоди. У працях [3, 4] викладено основи і визначення циклічних добових змін теплообмінних процесів між ґрунтом і навколишнім середовищем.

Аналіз робіт [1-4] свідчить про те, що питання прогнозування циклічних добових змін температури ЗСП розкрите не в повному обсязі та має ряд недоліків, тобто потребує додаткового і більш конкретного вивчення.

Мета дослідження

Таким чином, метою статті є прогнозування циклічних добових змін температури ЗСП для підвищення достовірності результатів моніторингу під час застосування БЛА обладнаних тепловізорами.

Виклад основного матеріалу

Перевагами використання тепловізорів під час видового моніторингу ЗСП є всепогодність їх роботи (за наявності густого туману) та можливість цілодобового моніторингу (вдень і вночі). Дані переваги викликані особливостями розповсюдження електромагнітних хвиль в ІЧ діапазоні. Проте, відсутність розуміння фізичних процесів у навколишньому середовищі не дозволяє повною мірою використовувати наявні переваги тепловізорів. Протягом доби значення температури ЗСП зазнають циклічних змін. Це призводить до того, що в одні інтервали часу доби використання тепловізорів раціональне (за температурним розрізненням) (рис. 1), а в інші інтервали часу використання тепловізорів нераціональне (температура ЗСП та ґрунтових автодоріг практично однакові).

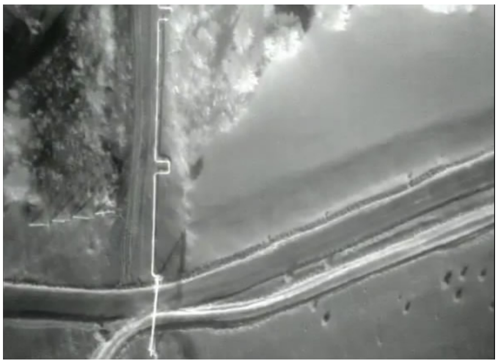


Рис. 1. Тепловізійне зображення ЗСП за допомогою БЛА

Вище наведені особливості можна врахувати, використовуючи загальноприйняті методи моделювання теплообмінних процесів. Зміна температури навколишнього середовища та інтенсивність радіаційного випромінювання Сонця є циклічними процесами, тому, відповідно до теорії теплообміну, це задача нестаціонарної теплопровідності з граничними умовами третього роду. Існуючі наукові роботи дозволяють визначати інерційні властивості ЗСП, а також - кількість тепла, що акумулюється в них протягом півперіоду коливання температури [4-6]. Проте, для спрощення математичних розрахунків, задається зміна температури навколишнього середовища у вигляді синусоїдальної (косинусоїдальної) функції, географічні фактори та вплив радіаційного випромінювання Сонця не враховуються.

Знаходження розв'язку диференційного рівняння теплопровідності, з врахуванням всіх необхідних обмежень, є досить затратним у часі та не завжди має аналітичний розв'язок. Існує необхідність спрощення поставленої задачі. Це можливо за умови знаходження виключно зміни температури поверхні ЗСП, при циклічному добовому впливі на них навколишнього середовища і радіаційного випромінювання Сонця. При цьому, розв'язання задачі на визначення прогріву ЗСП в глибину та акумуляцію ними тепла не беруться до уваги (рис. 2).

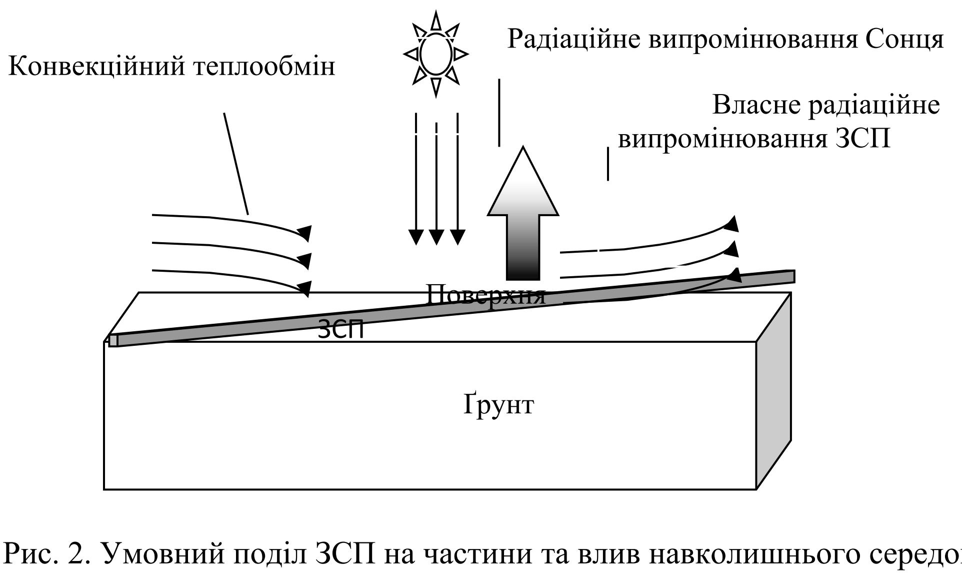


Рис. 2. Умовний поділ ЗСП на частини та влив навколишнього середовища на них

Задача на зміну температури поверхні ЗСП зводиться до відомої задачі із визначення нагрівання об'єкта із нескінченно великою теплопровідністю. Характерною особливістю такої задачі є те, що об'єкт вважається високотеплопровідним ($\lambda \to \infty$, $Bi \to 0$), тобто температура по всьому об'єму в кожний момент часу буде практично однаковою. У такому випадку $\nabla^2 T = 0$, а диференційне рівняння теплопровідності (Фур'є-Кірхгофа) набуває наступного вигляду [5]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{c\rho}, \quad (1)$$

де T – температура поверхні ЗСП, К; t – час перебування ЗСП під впливом теплообміну, с; P, – теплонапруженість, Вт/м^3; c – питома теплоємність ЗСП, Дж/(кг·К); ρ – густина ЗСП, кг/м^3.

Негативним у рівнянні (1) є його залежність від об'єму. Для великих значень об'ємів температура ЗСП буде практично незмінною, тільки зі зменшенням об'єму вплив ставатиме більшим. Отже, значення об'єму для знаходження циклічної зміни температури поверхні ЗСП має бути максимально малим.

Врахуємо одночасний вплив конвекційного і радіаційного теплообміну з навколишнім середовищем наступним чином:

$$P = P_{\text{к}} + P_{\text{р}} = \frac{1}{V}\left[\alpha S(T_{\text{с}} - T) + \alpha(\lambda) S q_{\text{с}} \tau_{\text{атм}} Y_{\text{с}} \sin\gamma k_{\text{п}} \left(\sin\gamma_1 + k_{\text{ш}} \sin\gamma_2\right)\right], \quad (2)$$

де $P_{\text{к}}$, $P_{\text{р}}$ – теплонапруженість під час конвекційного і радіаційного теплообміну, Вт/м^3; V – об'єм ґрунту, м^3; α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м^2·К); S – площа поверхні ЗСП, яка бере участь у конвекційному і радіаційному теплообміні, м^2; $T_{\text{с}}$ – температура навколишнього середовища, К; $\alpha(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт поглинання теплового випромінювання; $q_{\text{с}}$ – сонячна постійна, ($q_{\text{с}}$ = 1366) Вт/м^2; $\tau_{\text{атм}}$ – коефіцієнт пропускання атмосфери [7]; $Y_{\text{с}}$ – умова наявності Сонця; γ – кут максимальної висоти Сонця над горизонтом для визначеної географічної широти, град [8]; γ_1 – кут, що враховує обертання Землі навколо своєї осі, град; γ_2 – кут, що враховує обертання Землі навколо Сонця, град; $k_{\text{п}}$ – поправочний коефіцієнт для обертання Землі навколо своєї осі; $k_{\text{ш}}$ – поправочний коефіцієнт для географічної широти.

Рівняння (2) не дає змоги визначати більшість його складових, тому існує необхідність у їхньому поелементному описі. Так, температура середовища $T_{\text{с}}$ описується рівнянням [2]:

$$T_{\text{с}} = T_{\text{ср}} + 0{,}5\Delta T_{\text{с}} \sin(\rho' + Gt), \quad (3)$$

де $\Delta T_{\text{с}}$ – різниця між максимальним і мінімальним значеннями температури навколишнього середовища, К; $T_{\text{ср}}$ – середня температура навколишнього середовища протягом доби, К.

У рівнянні (3) введені такі позначки: $\rho' = \frac{\pi(t_{\text{п}} - t_{\text{с}} - t_{\text{кк}})}{t_{\text{сд}}}$ і $G = \frac{\pi}{t_{\text{сд}}}$;

де $t_{\text{п}}$ – час початку теплообміну, с; $t_{\text{с}}$ – час сходу Сонця ($t_{\text{с}} = 9 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$), с; $t_{\text{сд}}$ – довжина світлової частини доби ($t_{\text{сд}} = 12 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$), с.

Час кореляції $t_{\text{кк}}$ визначається за допомогою рівняння

$$t_{\text{кк}} = 3{,}6 \cdot 10^3 \left(t_{\text{ск}\max} - 12\right), \quad (4)$$

де $t_{\text{ск}\max}$ – час досягнення максимального значення температури середовища відповідно до прогнозу погоди, с.

Для знаходження γ використовується наступне рівняння:

$$\gamma = 90 - \vartheta + \xi \qquad (5)$$

де ϑ – географічна широта місцезнаходження ЗСП.

Запишемо кут у вигляді синусоїдального рівняння:

$$\xi = 23{,}45^{\circ} \sin\left[\frac{360}{365}(d - 81)\right], \qquad (6)$$

де d – порядковий номер дня року (1 січня – $d = 1$).

Кут γ_1 визначає зміну радіаційного випромінювання Сонця протягом доби

$$\gamma_1 = \pi \frac{(t_{\text{п}} + t - t_{\text{с}} - t_{\text{км}})}{t_{\text{сд}}}, \qquad (7)$$

де $t_{\text{км}}$ – час корекції місцевий, с.

Час корекції $t_{\text{км}}$ враховує фактичний місцевий час (літній або зимовий). Він вираховується за допомогою рівняння [9]:

$$t_{\text{км}} = 3{,}6 \cdot 10^{3}(t_{\text{рк max}} - 12), \qquad (8)$$

де $t_{\text{рк max}}$ – час коли Сонце перебуває у зеніті, с.

Кут γ_2, дозволяє враховувати вплив обертання Землі навколо Сонця. Так, у місяці рівнодення (березень, вересень) даний кут становить 0 або π, та не впливає на час перебування Сонця над лінією горизонту (прийнято вважати, що такий час складає 12 годин). В інших випадках час перебування Сонця над горизонтом збільшується (влітку) або зменшується (взимку). Кут γ_2 розраховується наступним чином:

$$\gamma_2 = \pi \frac{(9 - m)}{6}, \qquad (9)$$

де m – порядковий номер місяця року.

Коефіцієнт $k_{\text{п}}$ визначається за допомогою рівняння:

$$k_{\text{п}} = \frac{1}{1 + k_{\text{ш}} \sin\gamma_2}. \qquad (10)$$

Поправочний коефіцієнт $k_{\text{ш}}$ рахується достатнім, якщо ЗСП знаходиться в північній півкулі, та від'ємним в південній півкулі. Він визначається відповідно до табл. 1.

Таблиця 1. Залежність поправочного коефіцієнта від географічної широти

Географічна широта ϑ, град	60	50	40	30	20	10	0
Коефіцієнт $k_{\text{ш}}$	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

Позначимо $A = \frac{\alpha S}{c\rho V}$, $B = \frac{0{,}5\Delta T_{\text{с}}\alpha S}{c\rho V}$, $H = k_{\text{ш}} \sin\gamma_2$, $E = \frac{\alpha(\lambda) S q_{\text{с}} \tau_{\text{атм}} Y_{\text{с}} \sin\gamma k_{\text{п}}}{c\rho V}$,

$$N = \frac{\alpha(\lambda) S q_{\text{с}} \tau_{\text{атм}} Y_{\text{с}} \sin\gamma\, k_{\text{п}} \sin\gamma_3 k_{\text{ш}}}{c\rho V}.$$

Далі підставимо (2) в (1) та, розв'язавши диференційне рівняння теплопровідності для конвекційного і радіаційного теплообміну, отримаємо вираз:

$$T = T_{\text{ср}} + \frac{N}{A} + \frac{B(A\sin(\rho' + Gt) - G\cos(\rho' + Gt)) + E(A\sin(\mu + Gt) - H\cos(\mu + Gt))}{A^2 + G^2}, \qquad (11)$$

де $\mu = \dfrac{\pi(t_{\text{п}} - t_{\text{с}} - t_{\text{км}})}{t_{\text{сд}}}$.

Рівняння (11) не дає змоги визначити інерційну складову, що присутня при циклічній добовій зміні температури ЗСП. Тому необхідно звести рівняння до виду, який дозволяє виділити дану складову. Використаємо відоме тригонометричне рівняння Юніса. Таким чином, отримаємо вираз:

$$T = T_{\text{ср}} + 0{,}5\Delta T_{\text{с}}\frac{P'}{\sqrt{P'^2+1}}\sin(\rho' + Gt + \Psi) + R\left(\frac{P'}{\sqrt{P'^2+1}}\sin(\mu + Gt + \Psi) + H\right), \qquad (12)$$

де $P' = \dfrac{A}{G}$, $R = \dfrac{\alpha(\lambda)Sq_{\text{с}}\tau_{\text{атм}}Y_{\text{с}}\sin\gamma k_{\text{п}}}{\alpha S}$, $\Psi = -\arcsin\dfrac{1}{\sqrt{P'^2+1}}$.

Рівняння (12) є розв'язком диференційного рівняння теплопровідності (1), та дає змогу визначати циклічну добову зміну температури ЗСП. Враховуються інерційні властивості ЗСП, а саме: відмінність амплітуди температури поверхні ЗСП від температури ґрунтової (асфальтованої) дороги визначається членом $0{,}5\Delta T_{\text{с}}\dfrac{P'}{\sqrt{P'^2+1}}$ та $R\dfrac{P'}{\sqrt{P'^2+1}}$; відставання температури поверхні ЗСП від температури навколишнього середовища визначається значенням кута ψ.

Проведемо розрахунки, використовуючи математичну модель (12). Крім цього, використаємо дані, отримані за допомогою експериментальних досліджень, що проводились у період з 13 по 14 серпня 2013 року. На основі отриманих результатів побудуємо відповідну графічну залежність (рис. 3).

Коротко опишемо основні параметри ЗСП. Для розрахунків брались наступні об'єкти місцевості: ЗСП без рослинності (рілля), ЗСП вкриті рослинністю, асфальтована дорога. У зв'язку з великими розмірами ЗСП, вважається, що вони розташовані на необмеженій площі, яка бере участь у теплообміні рівномірно по всій поверхні, а її розміри зводяться до ділянки 1×1×0,05 м. Основні теплофізичні і масо-габаритні дані ЗСП наведено в табл. 2.

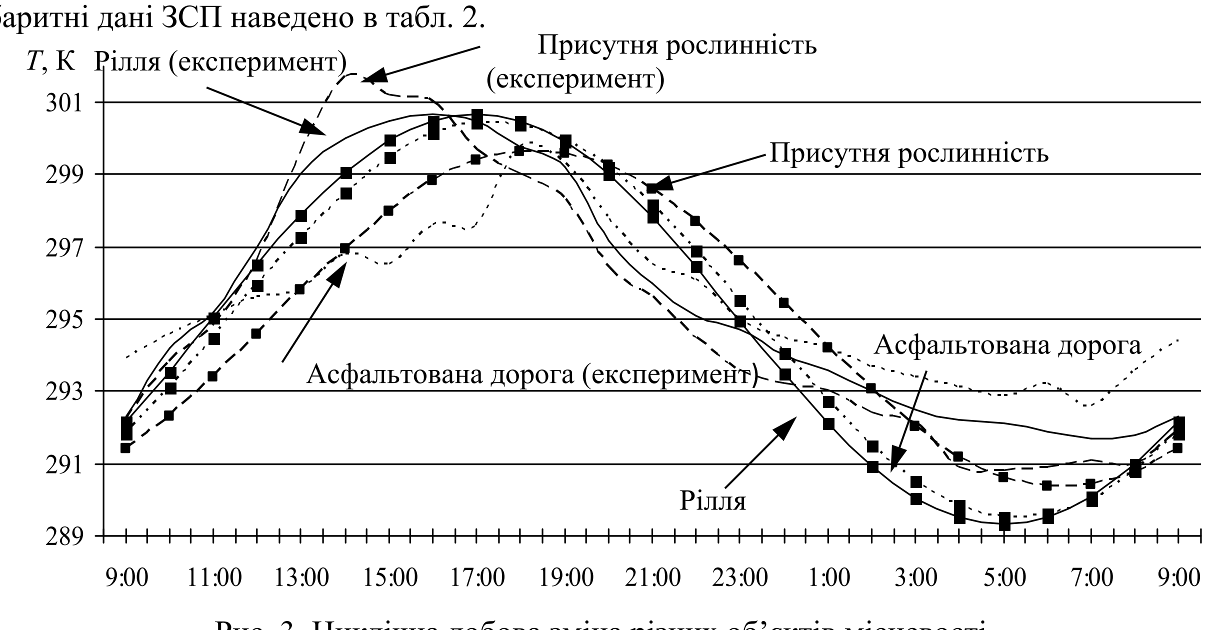


Рис. 3. Циклічна добова зміна різних об'єктів місцевості

Таблиця 2. Значення теплофізичних та масо-габаритних параметрів

Фізичні величини	з 9:00 13.08.2013 по 9:00 14.08.2013		
	Рілля	Присутня рослинність	Асфальтована дорога
$T_{ср}$, К	295	295	295
$\Delta T_с$, К	12	12	12
$t_п$, с	$9 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$9 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$9 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$
$t_с$, с	$6 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$
$t_{ск\ max}$, с	$14 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$14 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$14 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$
$t_{сд}$, с	$12 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$12 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$	$12 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3$
S, м^2	1	1	1
$\alpha(\lambda)$	0,95	0,9	0,6
$q_с$, Вт/м^2	1366	1366	1366
$\tau_{атм}$	0,36	0,36	0,36
$Y_с$	0	0	0
ϑ, град	50,5	50,5	50,5
d	214	214	214
α, Вт/(м^2·К)	15	19	15
c, Дж/(кг·К)	1100	4218	1670
ρ, кг/м^3	1250	1000	1100
V, м^3	0,05	0,05	0,05
$t_{рк\ max}$, с	46800	46800	46800
m	8	8	8
$k_ш$	0,5	0,5	0,5

Загальна тенденція по циклічній зміні температури ЗСП більш наближена до експериментальних даних (рис. 3), ніж у роботі [2]. Характерною особливістю математичної моделі є те, що амплітуда зміни температури ЗСП знаходиться в межах 289…302 К, що відповідає експериментальним даним. На рис. 3 присутній інерційний зсув температури ЗСП різних видів, що не є характерним для роботи [2]. Даний інерційний зсув зумовлений теплофізичними властивостями різних видів ЗСП.

Висновки

Таким чином, рівняння (12) являє собою математичну модель прогнозування циклічних добових змін температури ЗСП. При її розроблені, на відміну від математичної моделі в роботі [2], були враховані додаткові фактори впливу на зміну температури ЗСП, а саме: географічна широта місця розташування ЗСП, пора та день року, місцевий час (літній, зимовий), хмарність, додаткові теплофізичні параметри (питома теплоємність, густина). Існує можливість визначати інерційні властивості ЗСП за допомогою кута ψ. Порівняльний аналіз математичної моделі (12), математичної моделі роботи [2] та експериментальних даних вказує на те, що математична модель (12) дозволяє отримувати більш наближені до експериментальних даних значення температури ЗСП. Отже, існує можливість прогнозувати час доби, коли використання тепловізорів раціональне (за рахунок максимальної різниці значень між температурою ЗСП та інших об’єктів місцевості). Це дозволить враховувати даний факт при плануванні часу використання БЛА.

Перспективними напрямками подальших досліджень можна вважати: врахування впливу циклічних теплообмінних процесів у навколишньому середовищі на акумуляцію тепла ЗСП; формалізацію оцінювання ефективності застосування розробленої математичної моделі.

Література

1. Каплан В. Г. Экспериментальные исследования радиационных контрастов военнослужащих в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах электромагнитного спектра / Каплан В. Г., Липатов В. В., Яцык В. С. // Прикладная физика – Казань, 2006. – № 5. – С. 108–113.
2. Пат. 107170 Україна, МПК (2014.01) G01J 5/00. Спосіб підвищення ефективності застосування тепловізора / Слонов М. Ю., Марилів О. О., Топольницький М. В., Пилипчук В. В., Марилів О. О.; заявник і патентовласник Слонов М. Ю., Марилів О. О., Топольницький М. В., Пилипчук В. В., Марилів О. О. – № а 2013 14552; заявл. 12.12.2013; опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22. – 7 с.
3. Жильбер Госсорг. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Жильбер Госсорг ; [пер. с франц. Н. В. Васильченко]. – М. : Мир, 1988. – 416 с.
4. Димніч А. Х. Теплопровідність : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / А. Х. Димніч, О. А. Троянський. – Донецьк : 2003. – 370 с.
5. Теплотехника : [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / Луканин В. Н. [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. – [2-е изд., перераб.], – М.: Высшая школа, 2000. – 671 с.
6. Дмитрієв М. М. Визначення крайових умов на поверхні аеродромного покриття для постановки завдання моделювання його теплового поля / М. М. Дмитрієв, О. М. Панченко, О. Б. Деркачов, І. А. Рутковська // Вісник національного авіаційного університету. – 2008. – № 1. – С. 161–164.
7. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. – 2011. 520 с. – (Международные стандарты и рекомендуемая практика; изд. 17).
8. Наземное солнечное излучение [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://ust.su/solar/media/section-inner12/637/. Энергосистемы, 2012. – Назва з екрану.
9. Время восхода и захода Солнца в г. Киев [Електронний ресурс] – Режим доступу : http://voshod-solnca.ru/, 2015. – Назва з екрану.

Literatura

1. Kaplan V. G. Experementalnie isledovania radiatsionnuh kontrastov voennoslygiashih v sredniem i dalniem infrokrastnuh diapazonax elektromagnitnogo spektra / Kaplan V. G., Lipatov V. V., Iazik V. S. // Prikladnaia fizika – Kazan, 2006. – № 5. – S. 108–113.
2. Pat. 107170 Ukraina, MPK (2014.01) G01J 5/00. Sposib pidvishenia efektuvnosti zastosyvannia teplovizora / Slonov M. U., Maruliv O. O., Topolnitskiy M. V., Pulupchyk V. V., Maruliv O. O.; zaiavnuk i patentovlasnuk Slonov M. U., Maruliv O. O., Topolnitskiy M. V., Pulupchyk V. V., Maruliv O. O. – № a 2013 14552; zaiavl. 12.12.2013; opybl. 25.11.2014, Biul. № 22. – 7 s.
3. Gilber Gossorg. Infrakrasnaia termografia. Osnovu, texnika, primenenie / Gilber Gossorg ; [per. s franz. N. V. Vasilchenko]. – M. : Mir, 1988. – 416 s.
4. Dumnich A. X. Teploprovidnist : [pidrych. dlia styd. vusch. navch. zakl.] / A. X. Dumnich, O. A. Troianskii. – Donetsk : 2003. – 370 s.
5. Teplotexnika : [pidrych. dlia styd. vusch. navch. zakl.] / Lykanin V. N. [i dr.]; pod red. V. N. Lykanina. – [2-e izd., pererab.], – M.: Vuschaia shkola, 2000. – 671 s.
6. Dmitriev M. M. Vuznachenia kraiovuh ymov na poverhni aerodromnogo pokrutia dlia postanovku zavdania modeliyvania iogo teplovogo polia / M. M. Dmitriev, O. M. Panchenko, O. B. Derkachov, I. A. Rytkovska // Visnuk natsionalnogo aviatsionogo yniversutety. – 2008. – № 1. – S. 161–164.
7. Prilogenie 3 k konventsii o mejdynarodnoi grajdanskoi aviatsii. Metrologicheskoe obespechenie mejdynarodnoi aeronavigatsii. – 2011. 520 s. – (Megdynarodnue standartu i rekomendyemaia praktika; izd. 17).
8. Nazemnoe solnichnoe izlychenie [Elektronnui resyrs] – Rejum dostypy : http://ust.su/solar/media/section-inner12/637/. Energosistemu, 2012. – Nazva z ekrany.
9. Vremia voshoda i zaxoda Solnca v g. Kiev [Elektronnui resyrs] – Rejum dostypy : http://voshod-solnca.ru/, 2015. – Nazva z ekrany.

RESUME

M.V. Korobchinskiy, M.U. Slonov, A.A. Mariliv

Mathematic model of forecasting daily cycle temperature changes of agricultural lands

The object of the article is forecasting daily cycle temperature exchanges of agricultural lands to increase reliability of monitoring results while using unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with thermal imager.

The assignment of the article is creating mathematic model of forecasting daily cycle temperature exchanges of agricultural lands can take into consideration more factors that mathematic model in patent [2].

The question of monitoring of agricultural lands has a special place in the current development of the agricultural sector. This allows to react about their situation and to predict future changes in yields. One of the cheapest and most effective ways of visual monitoring of agricultural lands is using an UAVs. These UAVs are equipped with television surveillance cameras operating in the visible and infrared range of electromagnetic spectrum. This infrared range has several advantages that allow more effective monitoring of agricultural lands.

The equation (12) is mathematic model of forecasting daily cycle temperature changes of agricultural lands. Developing the model, we considered extra factors of influence on temperature changes of agricultural lands, such us: latitude of agricultural lands, season and day of the year, local time, cloudiness, extra termofisical parameters (specific thermal capacity, density). There is possibility to determine thermal inertia characteristic of agricultural lands using ψ angle. Analysis of mathematic model (12), [2] and experiment data is showing that mathematic model (12) can give more truthful results for experiment data. So, it enables to forecast day time when thermal imager using is rational (maximum difference of temperature between agricultural lands and other objects in the area). Temperature forecast allows for better time planning when using UAVs.

Надійшла до редакції 09.11.2016

